

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií

Studijní program: B2646 – Informační technologie
Studijní obor: 1802R007 – Informační technologie

**Studie změn impulzních odezev akustických prostředí
pomocí dvou mikrofonů**

**A Study of Changes of Impulse Responses in Acoustic
Environments Using Two Microphones**

Bakalářská práce

Autor: **Martin Veselý**
Vedoucí práce: doc. Ing. Zbyněk Koldovský, Ph.D.

V Liberci 15. 5. 2012

Zadání – stránka se nahradí oficiálním zadáním

Prohlášení:

Byl(a) jsem seznámen(a) s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval(a) samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

Datum 10.05.2012

Podpis:

Abstrakt:

Tato bakalářská práce se zabývá studiem impulzních odezev prostředí pomocí série pokusů. Dále se zabývá možným využitím impulzní odezvy k lokalizaci zdroje signálu v několika předem známých polohách.

V této bakalářské práci jsou použity signály nahrávané na dvou mikrofonech. Takto nahrané signály jsou uloženy v předem vytvořené databázi a pro potřeby jednotlivých pokusů je z nich odhadnuta impulzní odezva jako Wienerův filtr. Účinnost tohoto filtru je následně testována pomocí několika pokusů.

Lokalizace pozice zdroje signálu v předem známém umístění byla realizována pomocí porovnávání odhadnutého Wienerova filtru v jednotlivých možných pozicích zdroje a Wienerova filtru odhadnutého pro testovaný signál. Pro tuto metodu byla ověřena i robustnost řešení v případě drobných změn v okolí.

Klíčová slova:

Impulzní odezva, Wienerův filter, analýza odhadů MMSE, lokalizace polohy

Abstract:

This graduate work investigates the impulse responses of the environment through a series of experiments. It also considers a possible use of impulse response to localize the signal sources in several positions known in advance.

In this work, signals recorded using two microphones are used. The recorded signals are stored in a prepared database. For the purpose of individual experiments, the impulse response of these signals is estimated as a Wiener filter. The effectiveness of these filters is tested through several experiments.

Localization of the signal source in some of the assumed positions that were measured in advance was made by comparing the estimated Wiener filter in each possible source positions and the estimated Wiener filter for the tested signal. The method was verified and its robustness in case of minor changes in the room was studied.

Keywords:

Impulse Responses, Wiener filter, analysis of MMSE estimates, location positions

Obsah

1	Úvod.....	6
2	Wienerův (MMSE) filtr.....	7
2.1	Teorie Wienerova (MMSE) filtru – formulace problému.....	7
2.2	Způsoby odhadu Wienerova (MMSE) filtru.....	7
2.2.1	Wienerův FIR filtr.....	8
3	Databáze stereofonních záznamů.....	9
3.1	Použité zařízení.....	9
3.1.1	Mikrofony.....	9
3.1.2	Předzesilovač.....	9
3.1.3	Nahrávací zařízení.....	10
3.1.4	Zapojení aparatury.....	10
3.2	Postup nahrávání.....	11
3.2.1	Práce s nahrávacím softwarem.....	11
3.2.2	Nastavení softwaru pro nahrávání.....	11
3.2.3	Rozlišování nahrávek v databázi.....	13
4	Odhady MMSE filtrů.....	15
4.1	Způsob výpočtu.....	15
4.2	Provedené pokusy.....	15
4.2.1	Pokus 1: Dvě různé nahrávky jednoho signálu.....	15
4.2.2	Pokus 2: Stejný signál ve stejném místě a dvou různých polohách.....	16
4.2.3	Pokus 3: Dva různé signály.....	18
4.2.4	Pokus 4: Dva stejné signály při změně umístění.....	19
4.2.5	Pokus 5: Filtrace signálu s ozvěnou.....	20
4.2.6	Pokus 6: Filtrace signálu nahraných s mírně změněným okolím.....	23
4.3	Celkové zhodnocení.....	24
5	Identifikace polohy zdroje signálu (ve známé poloze).....	25
5.1	Prvotní úvaha.....	25
5.2	Realizace.....	25
5.2.1	Ověření předpokladů.....	25
5.2.2	Test robustnosti metody.....	29
6	Závěr.....	33
7	Použité zdroje.....	34
8	Obsah CD.....	35
	Vytvořená databáze záznamů.....	35
	Program pro výpočet filtru a jeho použití na zvolený signál.....	35
	Program pro lokalizaci pozice zdroje.....	35
	Elektronická verze této práce.....	35

1 Úvod

Při práci se signály nahrávanými v reálném prostředí dochází ke zkreslení nahraného signálu. Příčinou jsou různé vlastnosti a vlivy okolí. Patří sem například odrazy signálu (zvuku) od objektů v oblasti, mezi zdrojem signálu a nahrávací aparaturou (Fresnelova zóna) a mnoho dalších vlivů, které nelze nikdy zcela eliminovat. Toto zkreslení ale můžeme vyjádřit jako impulzní odezvu daného prostředí.

Cílem této práce je pomocí série několika různých pokusů se stereofonními mikrofony a jedním zdrojem signálu (reproduktorem) zjistit, k jakým změnám ve zkreslení (impulzní odezvě prostředí) dojde, bude-li se zdroj signálu (reproduktor) v prostředí pohybovat nebo jenom měnit směr, ve kterém bude daný zvukový signál vysílán. Tyto nahrávky byly ukládány do databáze pro další možné použití při následných pokusech nebo pro případ, že by některý z pokusů bylo potřeba opakovat. Způsob pořizování a uchovávání nahrávek v databázi je blíže popsán v dalších kapitolách této práce.

Impulzní odezvu pro daný signál (nahrávku) budeme zjišťovat jako cancellation filtr spočítaný tak, aby se zkoumaný signál, pro který byl odhadnut, co nejvíce přiblížil originálnímu signálu. V optimálním případě by zkoumaný a originální signál měly být ve všech měřitelných vlastnostech totožné. Proto k pokusům používáme dva mikrofony umístěné v pevné vzdálenosti od sebe. Z mikrofónů nahráváme stereofonně, aby u současně pořízených signálů došlo k minimálnímu rozdílu zkreslení, které může být způsobeno vlivem použité techniky a šumu z okolního prostředí (projíždějící auta, hrající si děti apod.). Proto při nahrávání jednotlivých signálů byl jediným rozdílem mezi nahrávkami na jednotlivých kanálech malý rozdíl v poloze mikrofónů (mikrofony jsou od sebe v řádu centimetrů). I u takto malého rozdílu v polohách jednotlivých mikrofónů ovšem dochází v nahraných signálech k drobným diferencím, které budeme v této práci zkoumat dále popsaným způsobem.

Z těchto nahraných dvojic signálů bude vypočítávána impulzní odezva jako Wienerův filtr. ho pomocí funkce implementované v prostředí Matlab. Pro potřeby vyjádření jednotlivých koeficientů hledaného Wienerova filtru byl jeden z kanálů zvolen jako referenční signál. K němu se budeme snažit pomocí nalezeného filtru co nejvíce přiblížit signál nahraný na druhém kanálu.

2 Wienerův (MMSE) filtr

Obsah této kapitoly, tj. postupy výpočtu a teorii Wienerova filtru jsem přeložil z volně dostupného dokumentu na internetu [1.].

Wienerův filtr řeší problém odhadu stacionárních signálů. Poprvé byl předveden Norbertem Wienerem v roce 1940. Jeho významným přínosem bylo využití statistického modelu pro odhadovaný signál (bayesovský přístup), kdy filtr je optimální ve smyslu MMSE.

2.1 Teorie Wienerova (MMSE) filtru – formulace problému

Máme dány dva procesy:

s_k , odhadnutý signál

y_k , pozorovaný signál

kteřé jsou slabě stacionární, se známými kovariančními funkcemi: $R_s(k)$, $R_y(k)$,
 $R_{sy}(k)$.

Zvláštním případem je signál poškozený přidaným šumem: $y_k = s_k + n_k$ se spojitě stacionárním
 (s_k, n_k) a danými $R_s(k)$, $R_n(k)$, $R_{sn}(k)$.

Cíl: Najít filtr h .

Konkrétně:

- Najít lineární MMSE odhad s_k založený na (celém nebo části) y_k .

2.2 Způsoby odhadu Wienerova (MMSE) filtru

Existují tři verze řešení tohoto problému. Kauzální, nekauzální a FIR filtr. V této práci je použita pouze metoda řešení pomocí FIR filtru.

$$\text{FIR filtr: } \hat{s}_k = \sum_{m=k-N}^k h_{k-m} y_m .$$

2.2.1 Wienerův FIR filtr

Vezmeme si FIR filtr délky $N + 1$:

$$\hat{s}_k = \sum_{m=k-N}^k h_{k-m} y_m = \sum_{i=0}^N h_i y_{k-i} \quad .$$

Potřebujeme najít koeficienty (h_i) minimalizující MMSE:

$$E(s_k - \hat{s}_k)^2 \rightarrow \text{minimální}$$

Chceme-li zjistit (h_i) , použijeme ortogonální princip:

$$E[(s_k - \hat{s}_k) y_{k-j}] = 0, j = 0, 1, \dots, N$$

Z toho plyne:

$$\sum_{i=0}^N h_i E[y_{k-i} y_{k-j}] = E(s_k y_{k-j})$$

$$\sum_{i=0}^N h_i R_y(i-j) = R_{sy}(j) \quad .$$

Tento systém rovnic můžeme zapsat ve tvaru:

$$\begin{bmatrix} R_y(0) & R_y(1) & \dots & R_y(N) \\ R_y(1) & \ddots & \ddots & \ddots \\ \vdots & \ddots & \ddots & R_y(1) \\ R_y(N) & \ddots & R_y(1) & R_y(0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_0 \\ \vdots \\ \vdots \\ h_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{sy}(0) \\ \vdots \\ \vdots \\ R_{sy}(N) \end{bmatrix}$$

$$\text{nebo } R_y h = r_{sy} \Rightarrow h = R_y^{-1} r_{sy} \quad .$$

Jedná se Yule-Walkerovi rovnice, kde matice soustavy R_y je toeplitzovská. Soustavu lze vyřešit efektivně pomocí Levinson-Durbinova algoritmu.

3 Databáze stereofonních záznamů

Pro účely měření a následné analýzy bylo potřeba vytvořit databázi stereofonních záznamů v různých polohách zdroje signálu. Nahrávání probíhalo na zařízení zapůjčeném k tomuto účelu vedoucím práce (mikrofony, zdroje pro mikrofony, předzesilovač) a notebooku Acer Aspire 5930G. Přesnější specifikace použité nahrávací techniky viz níže.

3.1 Použité zařízení

3.1.1 Mikrofony

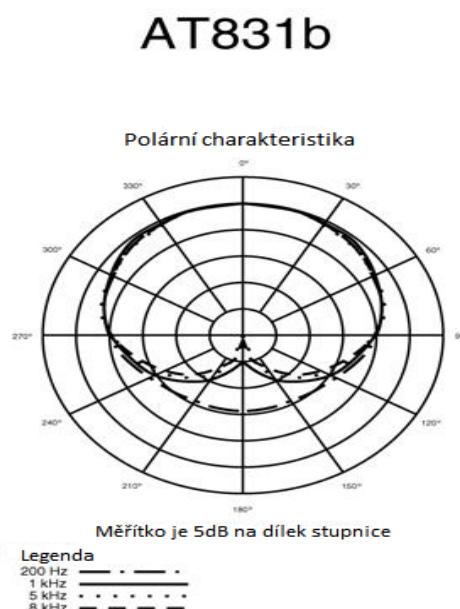
Pro nahrávání byly použity dva kondenzátorové mikrofony AT831b s kardioidní směrovou charakteristikou napájené pomocí dvou kompatibilních zdrojů AT8531 od firmy Audio-technica.



Ilustrace 2: Mikrofon a zdroj

Převzato z:

<http://www.gearnuts.com/store/detail/AT831b>

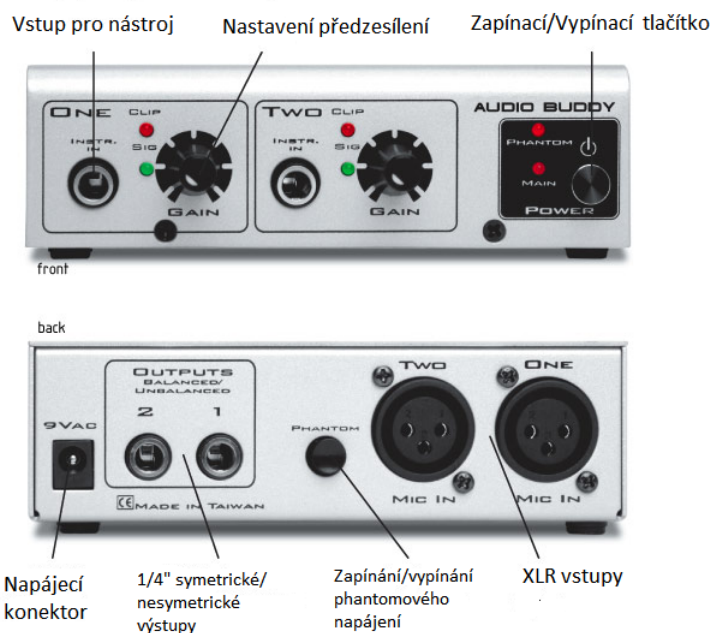


Ilustrace 1: Polární charakteristika mikrofónu

Převzato z: <http://www.wireless-headset-microphones.com/articles.asp?ID=132>

3.1.2 Předzesilovač

Jako předzesilovač bylo použito zařízení AudioBuddy od firmy M-Audio, které umožňuje pro každý z kanálů nastavit úroveň předzesílení. Během měření bylo předzesílení nastaveno pomocí ovládacího prvku na střední hodnotu, která podle specifikace zařízení odpovídá hodnotě 30dB.



převzato

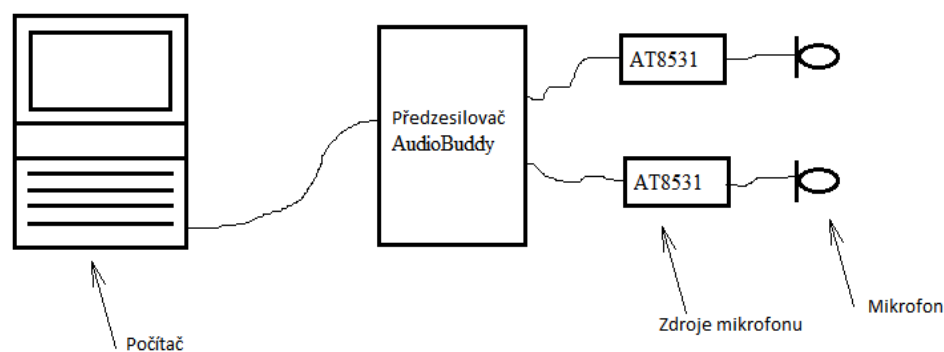
z http://www.audiotek.cz/produktyATK/maudio/maudio_audiobuddy_a1.jpg

3.1.3 Nahrávací zařízení

Samotné nahrávání výsledných signálů bylo prováděno na notebooku Acer Aspire 5930G s se zvukovou kartou Realtek ALC888/1200. Tento notebook byl použit současně jako přehrávač nahrávaného signálu. K přehrávání signálů byla použita externí USB zvuková karta HY554, do které byly zapojeny satelitní reproduktory soustavy 2.1 firmy Trust model 15418. Při měření bylo softwarově zvoleno přehrávání jen z pravého reproduktoru.

3.1.4 Zapojení aparatury

Pro nahrávání signálů, na kterých byla prováděna měření a pokusy byla použita výše uvedená zařízení. Zapojení aparatury je schématicky demonstrováno na obrázku obr. 1.



obr. 1: Schéma zapojení

3.2 Postup nahrávání

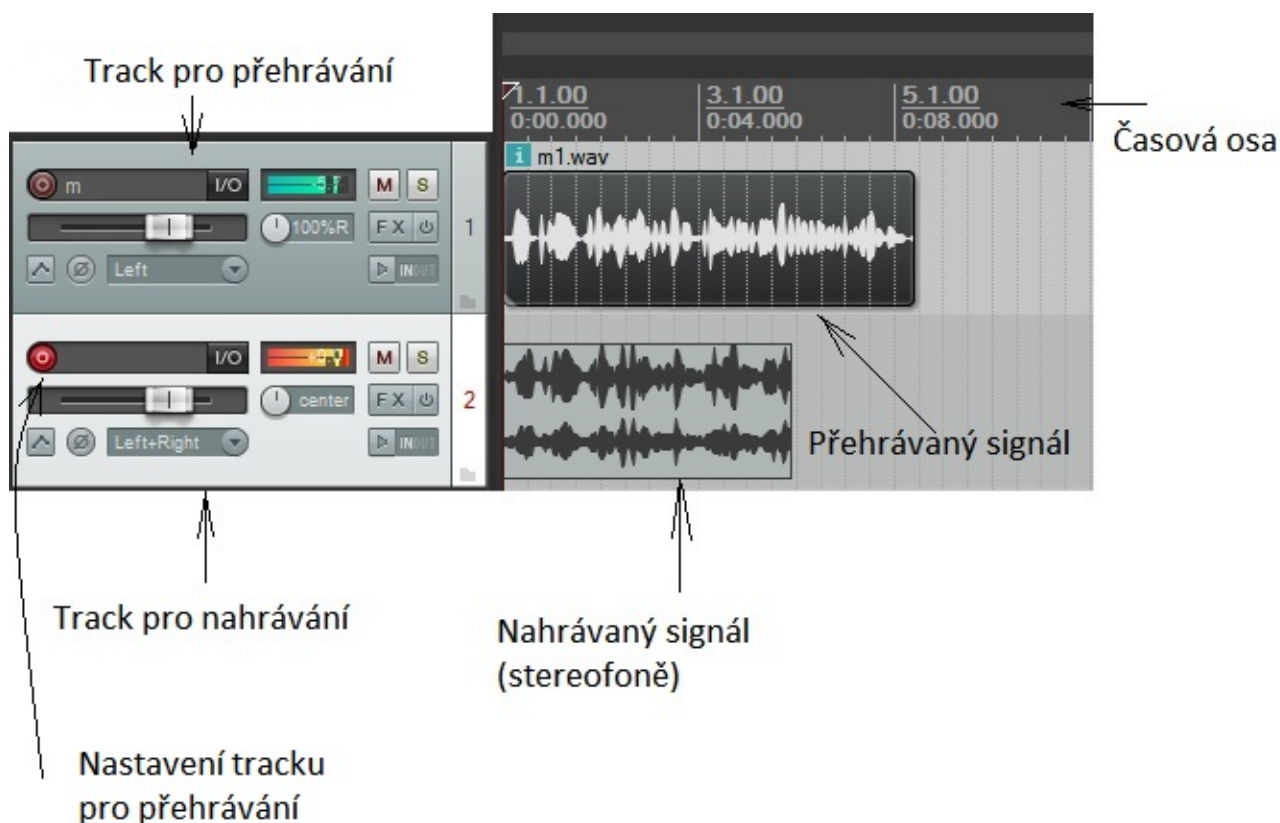
3.2.1 Práce s nahrávacím softwarem

Pro pořízení jednotlivých nahrávek bylo nutné použít software, který dokáže synchronizovaně přehrát připravený záznam a zároveň zachytit signál na stereofonním vstupu. Pro nahrávání záznamů byl zvolen software Reaper ve verzi 4.10 v testovací době za využití Evaluation licence. Tento program nejlépe splňoval požadavek na současné přehrávání a nahrávání z různých vstupních a výstupních zařízení, připojených k použitému počítači.

3.2.2 Nastavení softwaru pro nahrávání

Po zapnutí softwaru se zobrazí pracovní prostředí, kde velkou část plochy zabírá prostor pro práci s jednotlivými tracky a časové osy. Vlevo, v horním rohu jsou umístěny ovládací prvky pro práci s projektem. Pod nimi je panel, kam se vkládají jednotlivé nové tracky (bloky pro práci se zvukovými stopami) kliknutím pravým tlačítkem myši a výběrem položky menu „Insert new track“. Další možností jak přidat nový track je kombinace kláves Ctrl+T.

Prostředí během nahrávání zobrazuje následující obrázek obr. 2.



obr. 2: Screenshot programu reaper

Pro potřeby nahrávání byly vytvořeny dva tracky pro práci s jednotlivými signály. První byl použit jako zdroj signálu a nastaven na přehrávání pouze z pravého reproduktoru. Poté do řádku s tímto trackem byl vložen vybraný signál a posunut na začátek časové osy.

Druhým trackem bylo realizováno samotné nahrávání. Track pro nahrávání se nastaví použitím tlačítka *Record Armed* (červené tlačítko v levém horním rohu druhého bloku).

Tímto postupem byl připraven software pro nahrávání (zobrazeno na předcházejícím obrázku obr. 2). Nahrávání bylo spuštěno kliknutím na tlačítko *Record*. Nahrávání bylo ukončeno stiskem klávesy mezerník. Následně se nahrávka automaticky uložila do předem nastaveného adresáře. Zde byla přejmenována a přesunuta do databáze.

Pro řešení práce jsou používány stereofonní záznamy testovaných signálů. Z každé pořízené nahrávky v databázi je použit záznam na prvním kanálu jako referenční signál pro výpočet koeficientů filtru. Tím je následně filtrován signál na druhém kanálu.

Experiment byl prováděn v místnosti panelového domu. Aparatura byla umístěna na psacím stole. Při jejím rozestavování byly voleny pozice, které je snadné znovu nalézt pomocí výrazných a neměnných bodů (např. rohů, spár vzniklých sesazením desky ze dvou částí apod.). Toto postavení je zobrazeno na následujících obrázcích Ilustrace 3 a Ilustrace 4.



Ilustrace 3: Pohled z vrchu na zapojenou aparaturu



Ilustrace 4: Pohled zepředu na zapojenou aparaturu

Pro účely zadání byl po dohodě s vedoucím práce zvolen počet dvou různých míst a čtyř různých pozic zdroje signálu. Místa byla určena na rozích stolu, proti nahrávací aparatuře. Pozice byly číslovány od jedné do čtyř, kdy v pozici 1 byl reproduktor směřován přímo na nahrávací aparaturu a v každé následné pozici byl reproduktor otočen o 90° po směru hodinových ručiček, jak ukazují následující ilustrace Ilustrace 5, Ilustrace 6, Ilustrace 7, Ilustrace 8.



Ilustrace 5: Pozice 1



Ilustrace 6: Pozice 2



Ilustrace 7: Pozice 3



Ilustrace 8: Pozice 4

3.2.3 Rozlišování nahrávek v databázi

Toto rozestavení reproduktorů bylo přeneseno i do struktury databáze, kdy v kořenovém adresáři byly vytvořeny složky s názvy označujícími místo (např. místo 1). Do každé z nich byly umístěny další složky s názvem polohy, ve které se nacházel zdroj signálu při nahrávání (např. poloha 1). Sem byly umísťovány v daném místě a poloze vytvořené nahrávky.

Jako zdroje signálu byly při vytváření databáze stereofonních záznamů použity předem vytvořené nahrávky. Obsahovaly vzorky řeči čtyř různých mluvčích (dva muži, dvě ženy). Ke každé

z těchto nahrávek byly pořízeny tři záznamy a pojmenovány následujícím způsobem:

Základ názvu výsledného souboru byl převzatý název zdrojového souboru rozšířený na konci o číslici. Tato poslední číslice v názvu nahraného záznamu (před koncovkou souboru) označuje verzi nahrávky. Například: Pokud se nahraný záznam jmenuje *m22*, jedná se o druhou nahrávku signálu *m2*.

Nechceme-li použít přímo databázové řešení využívající například databázi SQL, jeví se tato struktura uchovávání nahrávaných signálů jako nejsnáze realizovatelná, nejprehlednější, nejadaptabilnější z pohledu dalších případných modifikací. Například snadné rozšiřování o další pozice a místa zdroje. Je však třeba počítat s omezením na maximálně deset verzí nahrávek jednoho signálu. Vzhledem k cílům a rozsahu práce se tento počet zdá jako dostačující. Spíše se bude pravděpodobně zvyšovat počet pozic a různých signálů, než množství verzí jednoho signálu.

Jinou zkoušenou metodou bylo například všechny nahrávky ukládat do jedné složky. Tento způsob, byť má výhodu v možnosti nastavení nahrávacího softwaru na ukládání nahrávek přímo do vybrané složky se zdá méně vhodný. V případě zvýšení počtu umístění, poloh zdroje nebo množství zkoumaných nahrávek může dojít k překročení rozsahu „indexů“ pro jejich značení. V tomto případě bude nutno upravit názvy záznamů v celé databázi.

4 Odhady MMSE filtrů

4.1 Způsob výpočtu

Výpočet filtrů byl prováděn pomocí programu Matlab. Během jednotlivých pokusů byla brána nahrávka z prvního kanálu (x_1) jako záznam původního signálu a nahrávka na druhém kanálu (x_2) jako zkreslený signál, ke kterému budeme hledat filtr (h) tak, aby $x_1 = x_2 * h$.

Pro samotný výpočet h byla použita funkce *miso_firwiener* (N, X, Y) od Keenan Pepper. V této práci byla použita verze s datem poslední modifikace 21. prosince 2007. Parametr N určuje požadovaný řád filtru, za parametr X se dosazuje signál (x_2), který potřebujeme filtrovat a parametr Y je signál (x_1), který chceme pomocí filtrace získat ze signálu x_2 .

Vypočtené koeficienty filtru h byly použity jako parametr pro funkci Matlabu *filter* (h, a, x), která provede samotné filtrování zvoleného signálu. Tato funkce má vstupní parametry h, a, x , kde parametrem h je vektor koeficientů filtru, parametrem a je nastavení normalizace hodnot h (při použití v této práci nastavena na 1) a parametr x je signál, který má být zfiltrován.

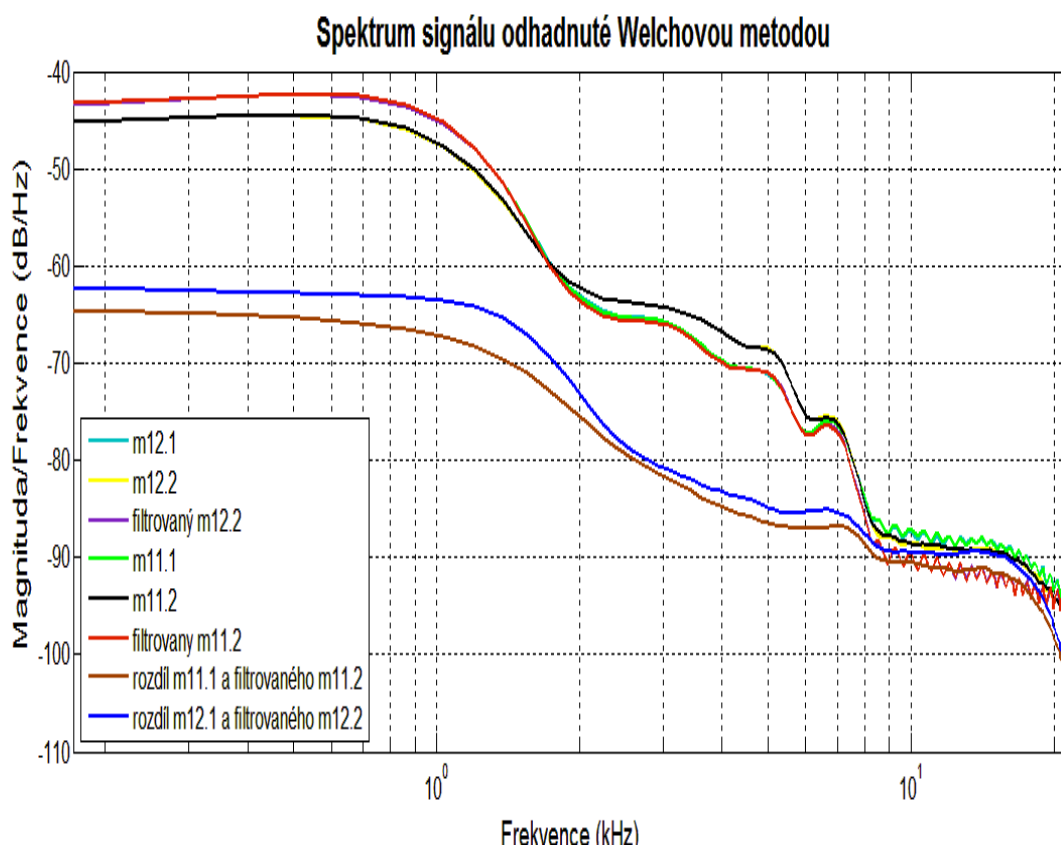
4.2 Provedené pokusy

Analýza impulzní odezvy byla prováděna pomocí pokusů. Byly vypočítány koeficienty filtru pro jeden ze signálů umístěných v databázi a výsledek byl použit k filtraci jiného zvoleného signálu. Na tomto filtrovaném signálu bylo poté analyzováno, s jakou účinností bude tento vypočítaný filtr pracovat pomocí vyhodnocování magnitudových spekter jednotlivých signálů použitých při pokusu. Těchto pokusů lze udělat nepřeberné množství. V této práci je zmíněno jen několik, na kterých lze dobře demonstrovat danou problematiku.

Magnitudová spektra jednotlivých signálů byla odhadnuta Welchovou metodou. Tato spektra byla zobrazena v prostředí Matlab.

4.2.1 Pokus 1: Dvě různé nahrávky jednoho signálu

V prvním pokusu bylo zjišťováno, k jakým změnám filtru dojde, nezmění-li se okolní prostředí a testovací signál. K tomuto pokusu jsou použity dvě různé nahrávky (*m11* a *m12*) stejného signálu, které se liší pouze časem jejich pořízení.



obr. 3: Spektrum pokusu 1 - *m11* a *m12*

Výsledná magnitudová spektra pro jednotlivé signály použité během popisovaného pokusu zobrazuje graf obr. 3.

Při studiu výsledného grafu (obr. 3) je vidět, že oba zkoumané signály mají téměř totožná magnitudová spektra. Drobné rozdíly jsou způsobeny především šumem z okolí, který byl zapříčiněn vlivy z okolního prostředí, které nebylo možno při nahrávání ovlivnit ani eliminovat (projíždějící auta apod.).

Z grafu magnitudových spekter na obr. 3 je vidět, že účinnost vypočteného filtru (impulzní odezvy) je pro oba signály téměř shodná. Z toho lze usuzovat, že pokud by byl pokus prováděn v naprosto uzavřeném prostředí bez možnosti ovlivnění výše zmíněnými vlivy z okolí, byl by filtr h (impulzní odezva) pro oba testované signály shodný.

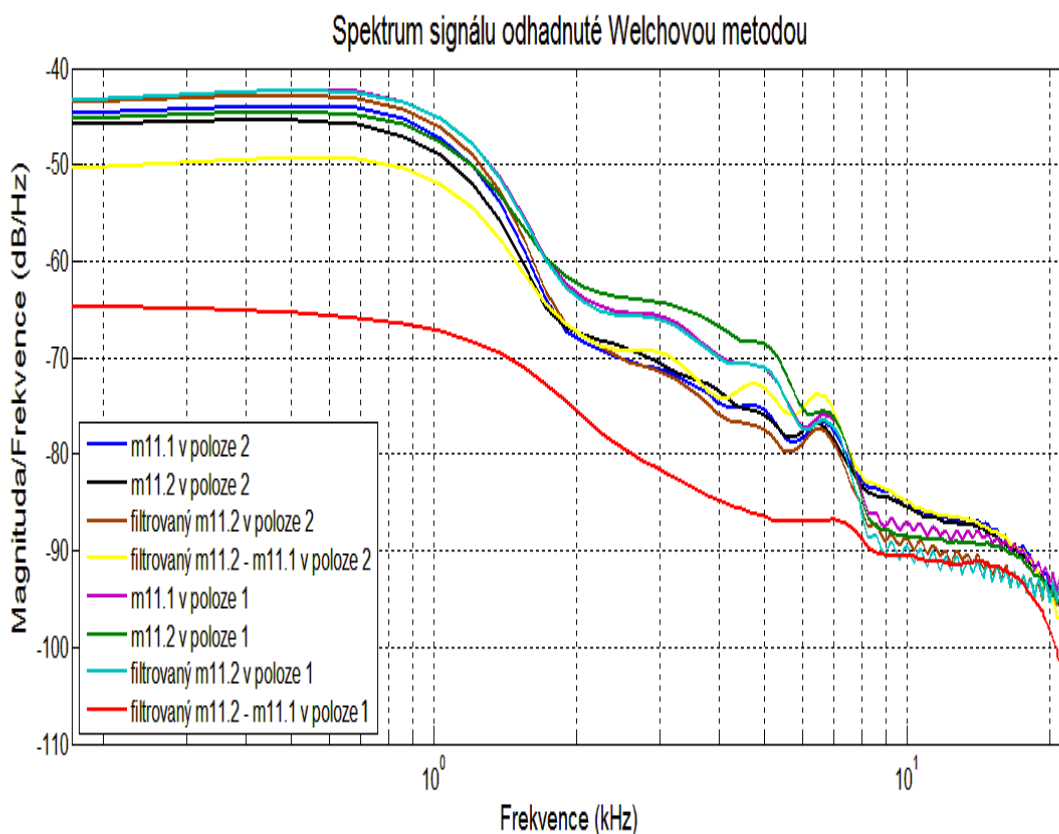
4.2.2 Pokus 2: Stejný signál ve stejném místě a dvou různých polohách

Jako druhý byl proveden pokus, ve kterém bylo zkoumáno, k jakým změnám ve výsledcích filtrace pomocí vypočteného filtru (impulzní odezvy) dojde, změníme-li směr, ve kterém bude zdroj signálu „vysílat“.

Při tomto pokusu je možno si vybrat, zda budeme filtr počítat ze signálu *m11* nebo *m12* místo1/poloha1 a aplikovat ho na příslušný signál (*m11*, *m12*) místo1/poloze2, protože oba tyto signály jsou pro naše potřeby totožné. Jediným rozdílem je rušení z okolního prostředí. Tyto vlivy

se mění náhodně v čase pořízení každé nahrávky (nelze zajistit, aby auto projelo v okolí dvakrát stejně) Proto pro účely pokusu není důležité, kterou nahranou verzi zvoleného signálu v dané poloze použijeme.

Při tomto pokusu byl za původní signál zvolen *m11*, umístěný v databázi ve složce *mistol/poloha1*. Odhadnutý filtr byl použit na *m11*, nacházející se v databázi ve složce *mistol/poloha2*. Cílem je pracovat se signály s maximálně konzistentním označováním. Liší se pouze polohou zdroje.



obr. 4: Pokus 2: Stejný signál ve dvou různých polohách

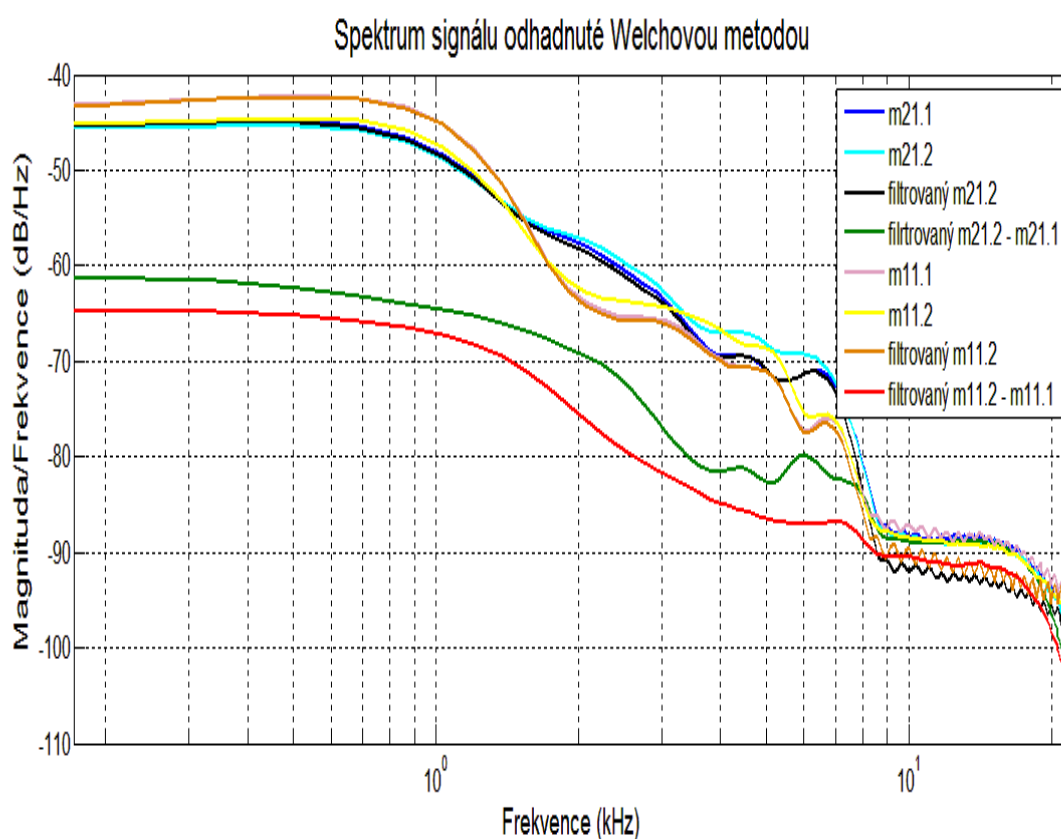
Při prozkoumání magnitudových spekter signálů použitých v tomto pokusu a zobrazených na obrázku obr. 4 vidíme, že i při relativně malé změně polohy zdroje signálu jeho pootočením o 90° po směru hodinových ručiček, dochází k výrazným změnám filtru (impulzní odezvy). Filtr vypočítaný pro zdroj v původní poloze dosahuje výrazně lepších výsledků, než když je filtr (impulzní odezva) použit pro signál z pootočeného zdroje. Rozdíl mezi originálním signálem a k němu příslušným signálem, kterým jsme se mu pomocí vypočteného filtru snažili přiblížit je totiž výrazně menší.

4.2.3 Pokus 3: Dva různé signály

Cílem pokusu bylo zjistit, k jakým změnám ve výsledku filtrace dojde, aplikujeme-li filtr na jiný signál, než pro který byl spočítán. Při tomto pokusu byly zdroje obou signálů ve stejném postavení.

Tento pokus byl nejprve proveden pro signály se stejným druhem mluvčího (muž, žena). Poté bylo testováno, k jakým dojdeme výsledkům, pokud se spočítaný filtr (impulzní odezva) použije na jiný druh mluvčího, než pro který byl vypočten.

Při pokusu se stejným typem mluvčího byly použity signály s mužským hlasem *m11* a *m21* nahrané při stejné poloze zdroje. Výsledná magnitudová spektra jednotlivých signálů zobrazuje následující graf obr. 5.

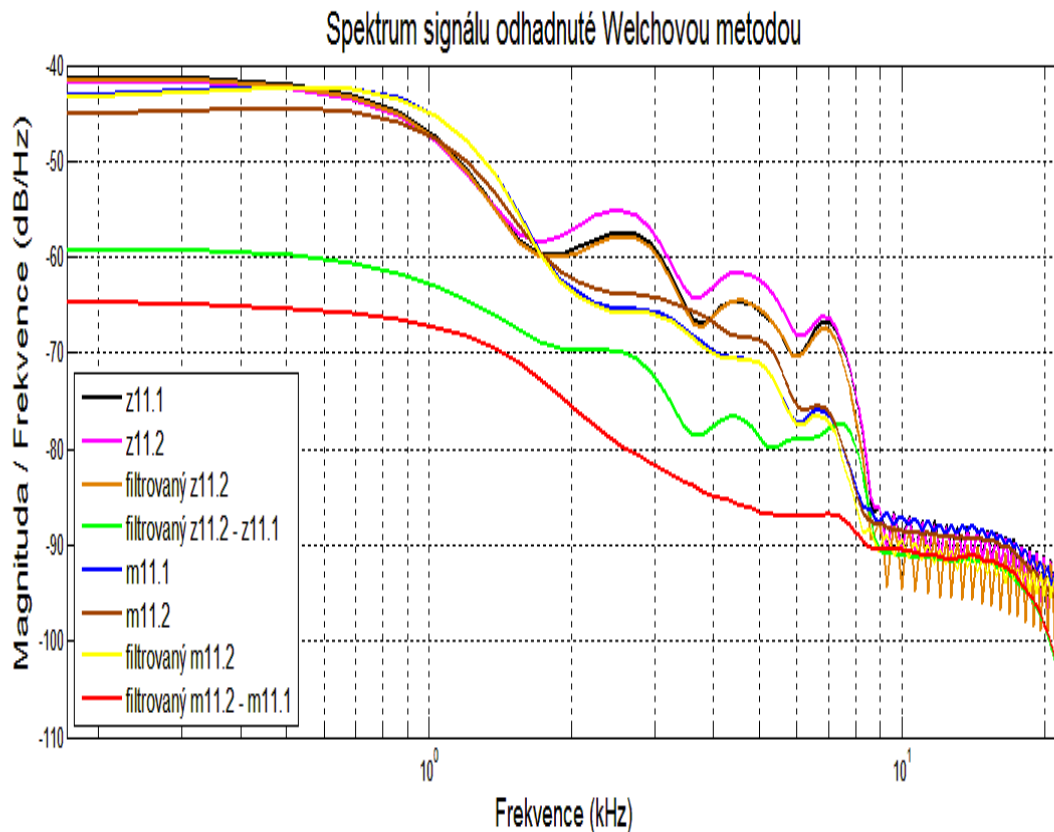


obr. 5: Pokus 3: Dva různé signály se stejným typem mluvčího

Při zkoumání magnitudových spekter signálů použitých při tomto pokusu, která jsou zobrazena na předchozím obrázku obr. 5 je vidět, že rozdíl v účinnosti filtrace obou signálů je přibližně stejný jako na grafu s označením obr. 3, který zobrazuje magnitudová spektra dvou stejných signálů nahraných v různém čase. Výrazná odchylka je patrná pouze u frekvencí, které byly v signálu, pro který byl vypočítán filtr obsaženy slaběji. Proto nebyly vypočteným filtrem tak silně potlačovány. Šum na těchto frekvencích napodobuje chování signálu, na který byl filtr použit. Z toho lze usuzovat, že impulzní odezva pro jednotlivé nahrávané signály by byla velmi podobná. V případě, že by byly signály nahrávány ve zcela uzavřeném prostředí, kde by nebyly

ovlivněny vnějším rušením, by úspěšnost filtrace mohla být dokonce ještě vyšší.

Při opakování pokusu nahradíme signál, na kterém je použit předvypočítaný filtr ($m21$) signálem jiného typu mluvčího. Při tomto experimentu byl použit signál $z21$ a dostaneme výsledky, které zobrazuje následný graf magnitudových spekter obr. 6.



obr. 6: Pokus 3: Dva různé signály s rozdílným typem mluvčího

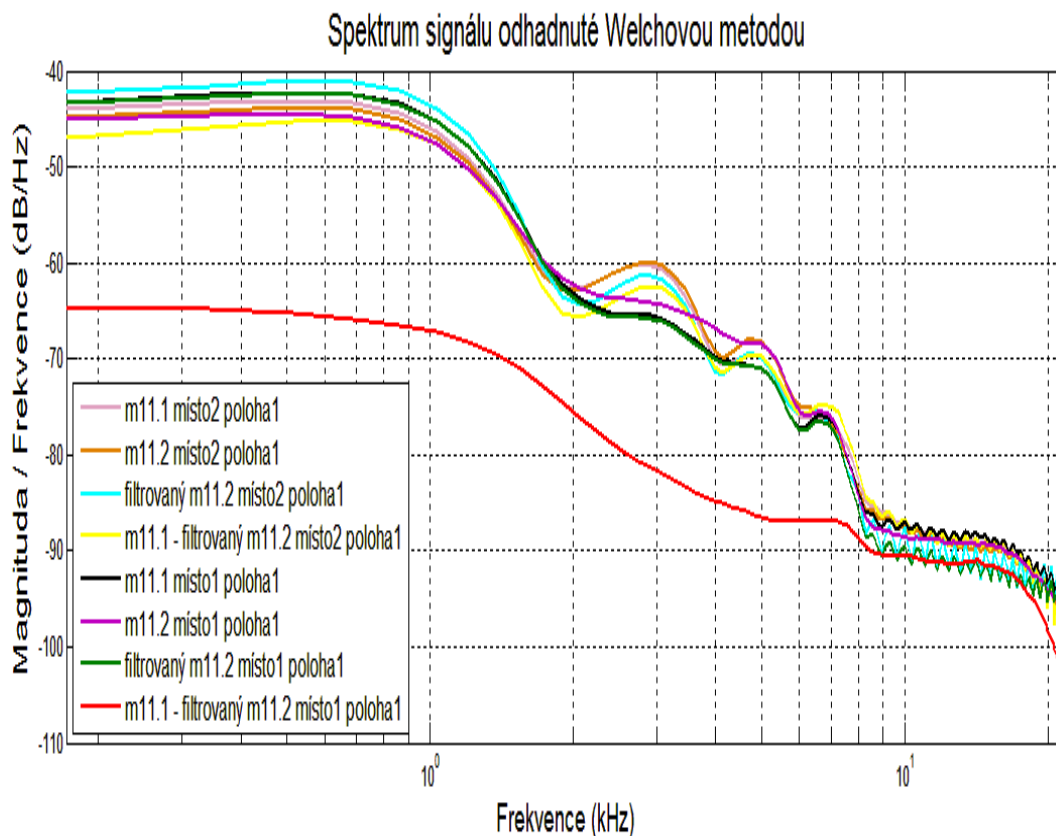
Při pohledu na graf, zobrazující magnitudové spektrum signálů vypočítaných v tomto pokusu (obr. 6) vidíme, že výsledky jsou velmi podobné jako při analýze grafu pro stejný typ mluvčích (obr. 5). Proto lze říci, že filtrace dosahuje jen minimálního rozdílu v účinnosti bez ohledu na použitý typ mluvčího. Hlavním rozdílem, kterého si lze všimnout mezi výsledky provedených pokusů je to, že signály se stejným typem mluvčích jsou si mnohem podobnější, než signály s rozdílnými typy mluvčích. Proto vypočítaný filtr dosahuje lepších výsledků, když je použit na signály se stejným typem mluvčího jako v signálu, pro který byl filtr (impulzní odezva) vypočítán. Přesto i pro signály s rozdílným typem mluvčích jsou si impulzní odezvy (filtry) velmi podobné.

4.2.4 Pokus 4: Dva stejné signály při změně umístění

Cílem tohoto pokusu bylo zjistit, k jakým změnám filtru (impulzní odezvy) dojde, pokud je použit na stejný signál, pro který byl spočítán, ale zdroj signálu je umístěn na jiném místě.

Pro potřeby tohoto experimentu byl vypočten filtr pro signál *m11* umístěný v databázi nahraných signálů ve složce *misto1/poloha1*. Poté byl využit k filtraci nahrávky stejného signálu (*m11*), která se v databázi nahraných signálů nacházela ve složce *misto2/poloha1*.

Výsledná magnitudová spektra jsou zobrazena na následujícím grafu obr. 7.



obr. 7: Pokus 4: Stejný signál v různých místech

Při pohledu na graf zobrazující frekvenční spektra signálů použitých v tomto pokusu (obr. 7) vidíme, že vypočtený filtr má při použití na signály nahrané při jiném umístění zdroje nahrávaného signálu téměř nulovou účinnost. Z toho lze usuzovat, že při změně umístění zdroje signálu dochází k výrazné změně filtru (impulzní odezvy).

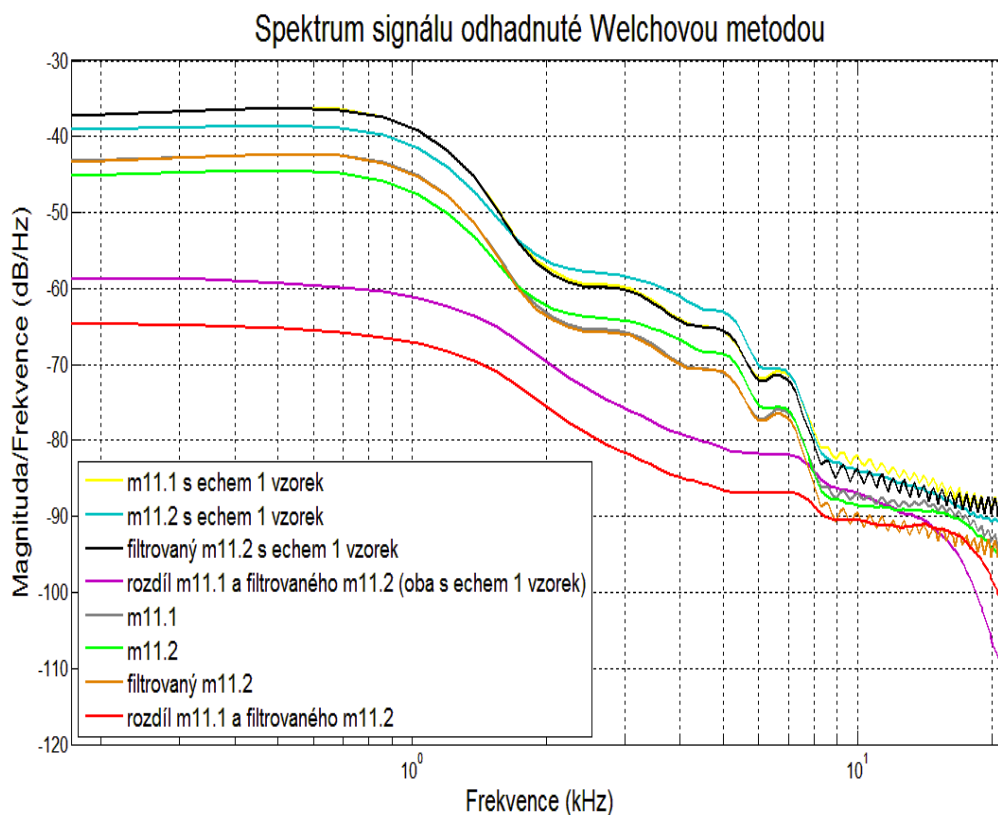
4.2.5 Pokus 5: Filtrace signálu s ozvěnou

V tomto pokusu byla analyzována účinnost filtrace na signálu, který je zkreslen ozvěnou.

Pro tento pokus byl použit nahraný signál *m11* umístěný v databázi ve složce *misto1/poloha1*, pro který byly stejně jako v předchozích pokusech spočítány koeficienty filtru h prostředím Matlab. Tento filtr byl následně použit na kopii původního signálu, do kterého byla uměle přidána ozvěna. Ta byla vytvořena v prostředí Matlab sečtením původního signálu se stejným signálem, jen zpožděným o různé počty vzorků. Tento pokus byl prováděn pro různá zpoždění

signálu. Čím větší bylo nastaveno posunutí, tím výraznější byla slyšitelná ozvěna.

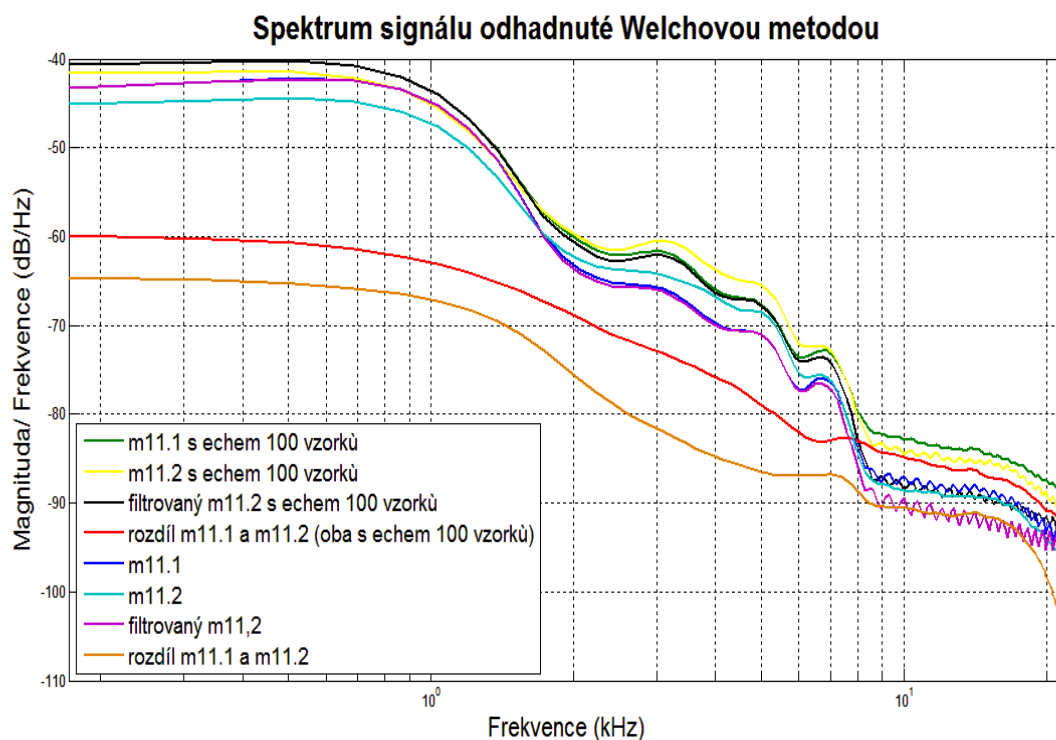
Jako první byl proveden pokus, kdy bylo nastaveno zpoždění pouze o jeden vzorek. Výsledná magnitudová spektra zobrazuje následný graf obr. 8.



obr. 8: Pokus 5: Filtrace signálu s ozvěnou posunutou o 1 vzorek

Při studiu grafu magnitudových spekter zobrazených na obr. 8 vidíme, že vypočítaný filtr (impulzní odezva) má pro oba signály (původní i se zpožděním) přibližně stejnou účinnost. Na vyšších frekvencích (konec zobrazovaného spektra) se dokonce pro signál, ke kterému byla přidána ozvěna, účinnost filtrace v porovnání s původním signálem ještě zvýší.

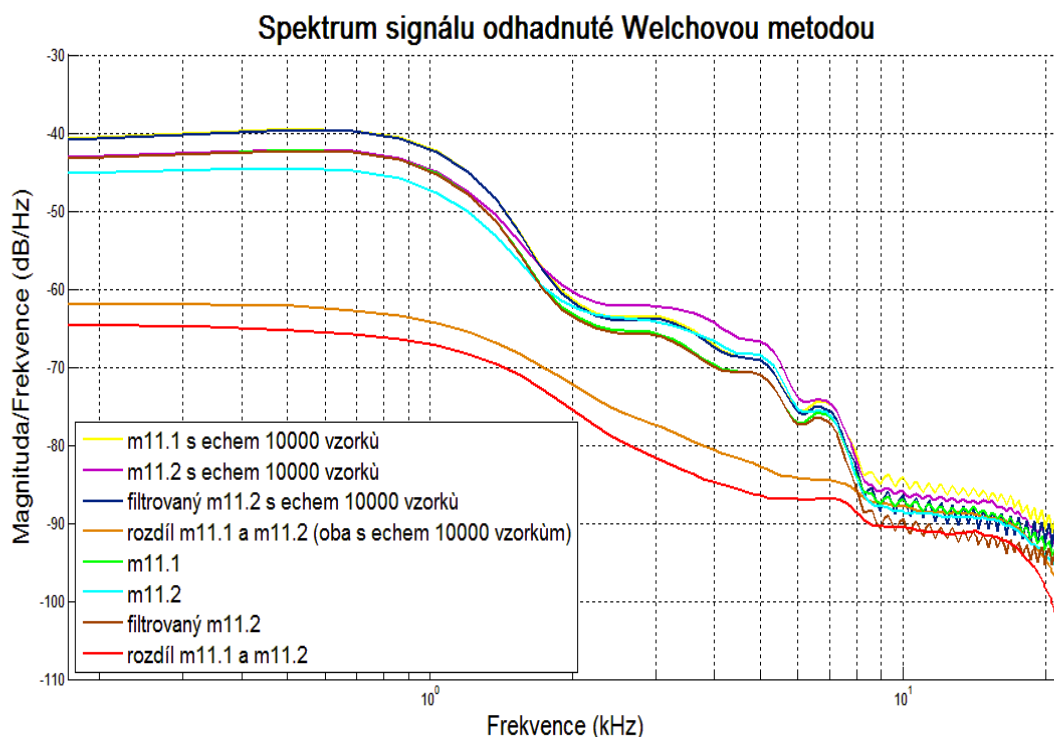
Dalším provedeným pokusem bylo zopakování předcházejícího pokusu. Jediným rozdílem je nastavení zpoždění při vytváření signálu s ozvěnou na 100 vzorků. Výsledná magnitudová spektra zobrazuje následující graf obr. 9.



obr. 9: Pokus 5: Filtrace signálu s ozvěnou posunutou o 100 vzorků

V tomto pokusu je podle výsledného grafu obr. 9 účinnost vypočteného filtru pro oba sledované signály (s ozvěnou i bez ozvěny) opět téměř shodná.

Jako poslední byl proveden pokus, ve kterém bylo nastaveno zpoždění při vytváření ozvěny na 10 000 vzorků. Výsledná magnitudová spektra použitých signálů zobrazuje následný graf obr. 10.



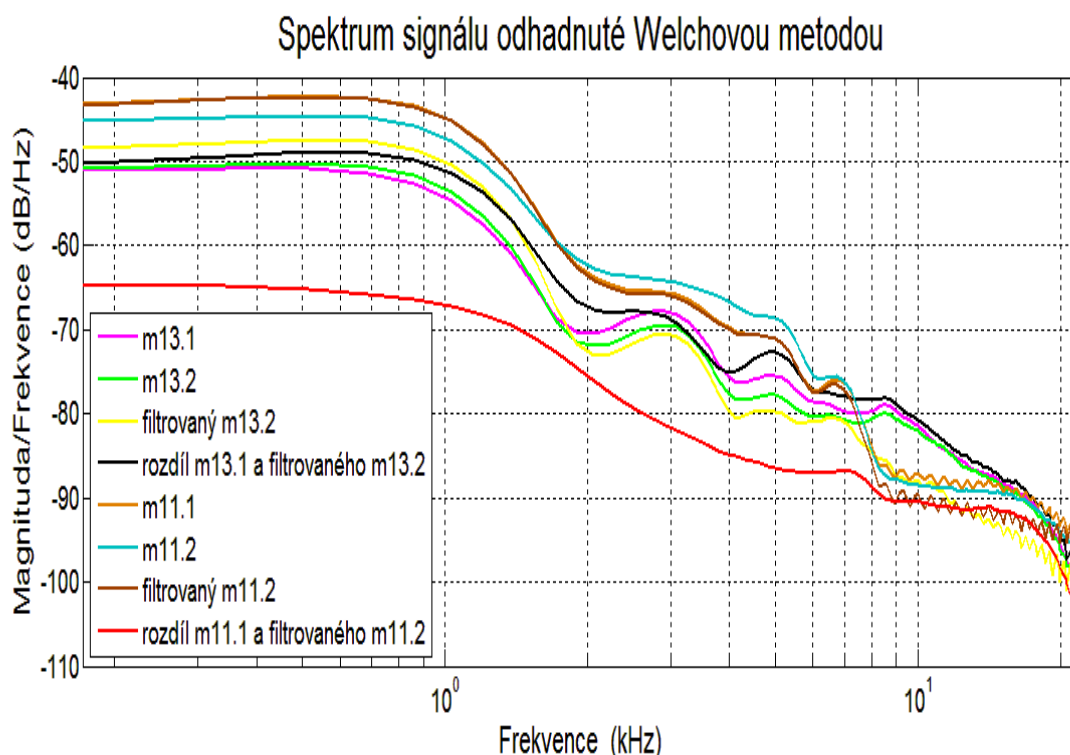
obr. 10: Pokus 5: Filtrace signálu s ozvěnou posunutou o 10000 vzorků

Při zkoumání předchozích grafů magnitudových spekter (obr. 8, obr. 9 a obr. 10) je vidět, že účinnost vypočítaného filtru (impulzní odezvy) se v podstatě se změnou zpoždění (ozvěny) zásadně nemění.

4.2.6 Pokus 6: Filtrace signálu nahraných s mírně změněným okolím

V tomto pokusu byly analyzovány důsledky drobných změn v prostředí. Tento vliv byl zjišťován pomocí vytváření nových nahrávek jednotlivých signálů (*m13*, *m23*, *z13*, *z23*). Nahrávání probíhalo v podmínkách, které byly v mezích možností co nejvíce přiblíženy prostředí, ve kterém probíhalo nahrávání původních záznamů. Bohužel replikovat naprosto přesně okolní prostředí pro nahrávání bylo vzhledem k jeho charakteru v podstatě nemožné. Nelze bohužel docílit naprosté eliminace drobných odchylek, jako je například rozdílné shrnutí závěsů.

Stejně jako u předchozích pokusů byly vypočítány jednotlivé koeficienty filtru (impulzní odezvy) pro signál *m11* umístěný v poloze *misto1/pozice1*. Tento filtr byl následně použit na signál *m13* umístěný ve stejné poloze. Výsledné magnitudové spektrum zobrazuje následný graf obr. 11.



obr. 11: Pokus 6: Filtrace signálu pořízeného v mírně změněných podmínkách

Při vyhodnocování grafu magnitudových spekter signálů pro tento pokus (obr. 11), je vidět, že vypočtený filtr měl po aplikaci na zkoumaný signál zanedbatelnou účinnost.

4.3 Celkové zhodnocení

Z výsledků výše popsaných pokusů docházíme k závěru, že k nejvýraznějším změnám vypočítaného filtru (impulzní odezvy) dochází, změní-li se poloha nebo „směrování“ zdroje signálu. Jak ukazují grafy magnitudových spekter pro pokus s pootočeným zdrojem signálu (obr. 4) a zdrojem signálu umístěným ve dvou různých místech (obr. 7). Dalším výrazným vlivem, který mění filtr (impulzní odezvu prostředí) jsou i nepatrné zásahy do okolního prostředí, jak zobrazuje graf pokusu, kdy použité signály byly nahrány při mírně změněných podmínkách (obr. 11).

Naproti tomu, pokud dojde pouze ke změně signálu nebo jeho zkreslení, filtr (impulzní odezva) se změní jen mírně a ovlivněny jsou pouze frekvence, které byly v původním signálu zastoupeny v jiném množství.

Z toho lze usuzovat, že impulzní odezva je mnohem citlivější na rozdíly v okolním prostředí než změny analyzovaného signálu. Navíc díky složitosti šíření zvuku prostředím nelze určit, jaké změny v prostředí jsou nezbytné, aby došlo k výraznějšímu zlepšení výsledků filtrace.

5 Identifikace polohy zdroje signálu (ve známé poloze)

5.1 Prvotní úvaha

V předcházející části práce bylo pomocí pokusů zjištěno, že filtr (impulzní odezva) závisí především na prostředí, ve kterém se nachází zdroj signálu a jeho pozici. Proto prvním nápadem by mohlo být použití impulzní odezvy signálu, pro který hledáme polohu jeho zdroje. Ovšem vypočítat z impulzní odezvy (filtru) polohu a postavení zdroje signálu je vzhledem k množství faktorů a vlivů, které působí na signál při průchodu prostředím a tím se výrazně podílejí na jejím vytváření je velmi komplikované, ne-li zcela nemožné. Proto další teorií, kterou musíme při realizaci identifikace polohy zdroje signálu prověřit, je možnost vypočítat filtry (impulzní odezvy) pro předem známé polohy a umístění zdroje signálu. S těmito filtry následně porovnávat vypočtený filtr (impulzní odezvu) pro zkoumaný signál.

5.2 Realizace

Pro ověření správnosti výše uvedených úvah bylo provedeno několik pokusů. Těchto pokusů v různých drobných obměnách lze opět provést velké množství. Pro účely této práce jich bylo provedeno jen několik. Provedené pokusy byly rozděleny do dvou etap. V první fázi byly testovány samotné předpoklady a úvahy, které jsou popsány výše. Následně byla testována robustnost navrhnutého řešení pro případ drobných změn v okolním prostředí.

V obou fázích byly spočítány v prostředí Matlab filtry (impulzní odezvy) pro signál *m11* ve všech polohách a pozicích zdroje signálu obsažených ve vytvořené databázi nahraných signálů. Poté byl vybrán signál v určité poloze a pozici zdroje signálu. I pro ten byl spočítán filtr (impulzní odezva). Takto vypočítaný filtr byl porovnán s jednotlivými předem vypočítanými filtry (impulzními odezvami) pro jednotlivé polohy a pozice zdroje. Jako umístění zdroje signálu byla zvolena pozice, pro kterou se filtry nejvíce shodovaly.

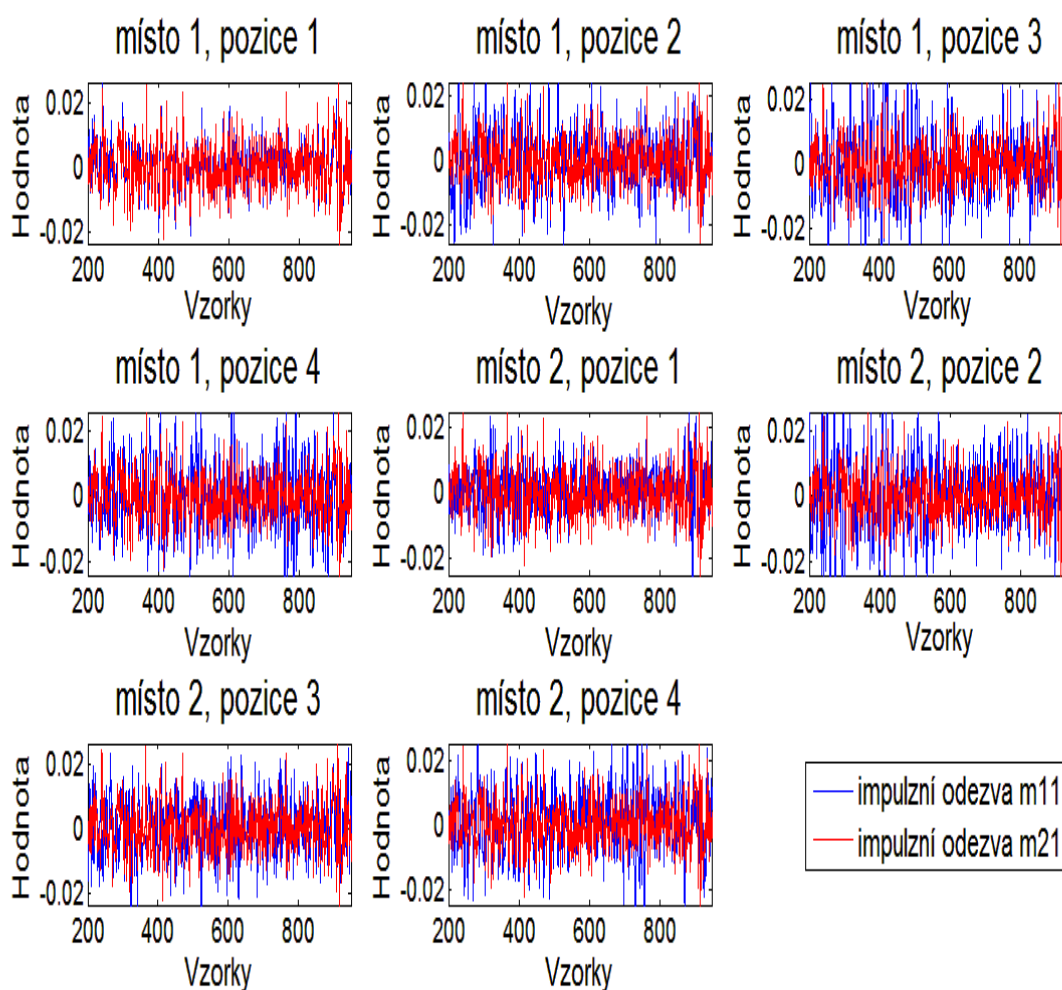
5.2.1 Ověření předpokladů

V první fázi byly použity pouze „původní“ signály uložené v databázi nahraných signálů. Díky nahrávání použitých signálů za stejných podmínek (ničím v místnosti nebylo úmyslně pohnuto a během nahrávání byla snaha co nejvíce minimalizovat i ty nejmenší změny, které mohli nastat například při přenastavování polohy reproduktoru), byl minimalizován vliv okolí. Filtry (impulzní odezvy) se měnily pouze v návaznosti na aktuálním postavení zdroje. Nahrávání probíhalo v místnosti, kde není možné zabránit třeba i neúmyslným změnám.

Jako demonstrace řešení jsou uvedeny výsledky dvou pokusů (pro různé typy mluvčích), kdy filtry (impulzní odezvy) jsou spočítány pro jednotlivá nastavení zdroje, jak je výše zmíněno ze signálu *m11*.

V první fázi bylo zkoušeno, zda navržený postup správně určí místo a postavení reproduktoru, pro signál *m21* (stejný typ mluvčího) který je uložen v databázi v adresáři *misto1/poloha1*. Výsledné porovnání filtrů (impulzních odezev) zobrazují následující grafy v obrázku obr. 12 a vypočtené rozdíly filtrů jsou uvedeny v následující tabulce tab. 1. Rozdíly impulzních odezev (filtrů) byly ve všech prováděných pokusech vypočítávány v prostředí Matlab

jako $\sum_{i=1}^n |h_v[i] - h_p[i]|$ kdy n je celková délka filtrů, $h_v[i]$ značí i -tý koeficient vypočítaného filtru pro daný signál a $h_p[i]$ znamená i -tý koeficient vypočítaného filtru v dané poloze zdroje.



obr. 12: Porovnávání impulzních odezev *m11* a *m21* pro jednotlivé polohy zdroje

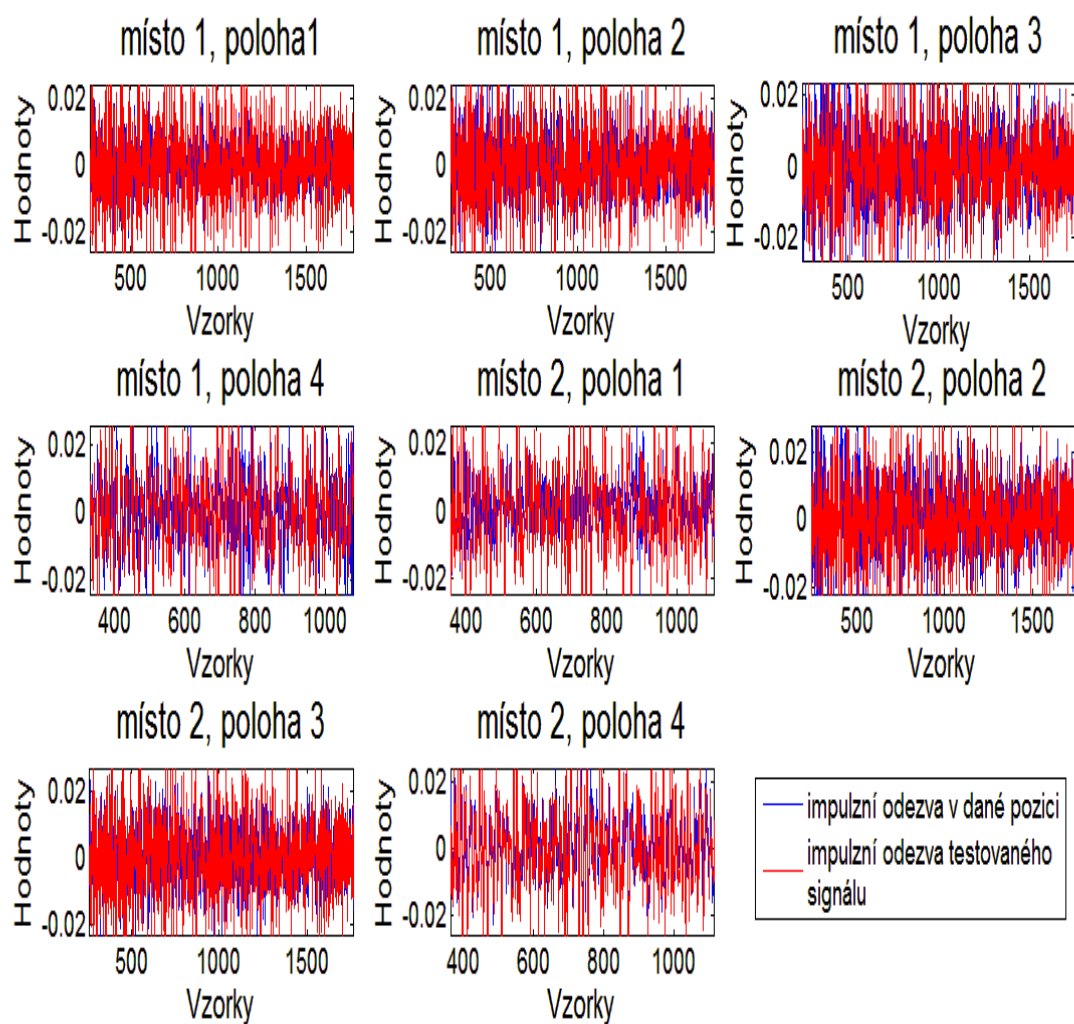
Umístění zdroje	Rozdíl odezev
Místo 1, Poloha 1	48,32
Místo 1, Poloha 2	62,38
Místo 1, Poloha 3	63,36
Místo 1, Poloha 4	61,85
Místo 2, Poloha 1	57,45
Místo 2, Poloha 2	57,45
Místo 2, Poloha 3	66,78
Místo 2, Poloha 4	65,66

tab. 1: Rozdíly odezev se stejným typem mluvčích

Podle výše zobrazených výsledků by použitý postup lokalizace zdroje signálu minimálně v tomto případě poskytl správnou informaci o poloze a umístění zdroje zkoumaného signálu.

Pro ověření funkčnosti tohoto postupu byl pokus zopakován. Testovaný signál *m21* byl v následujícím pokusu nahrazen signálem *z11* umístěným v databázi signálů *misto2/poloha4*.

Výsledné impulzní odezvy v tomto druhém experimentu zobrazuje následný graf obr. 13. Následující tabulka tab. 2 dokládá, jaká byla vypočtená shoda mezi filtry pro jednotlivé polohy zdroje a testovaný signál.



obr. 13: Porovnávání impulzních odezev pro jednotlivé pozice zdroje s impulzní odezvou pro kterou hledáme polohu

Umístění zdroje	Rozdíl odezev
Místo 1, Poloha 1	67,48
Místo 1, Poloha 2	75,21
Místo 1, Poloha 3	75,81
Místo 1, Poloha 4	75,84
Místo 2, Poloha 1	70,33
Místo 2, Poloha 2	77,75
Místo 2, Poloha 3	77,73
Místo 2, Poloha 4	65,32

tab. 2: Vypočtené rozdíly impulzních odezev pro různé pozice zdroje signálu

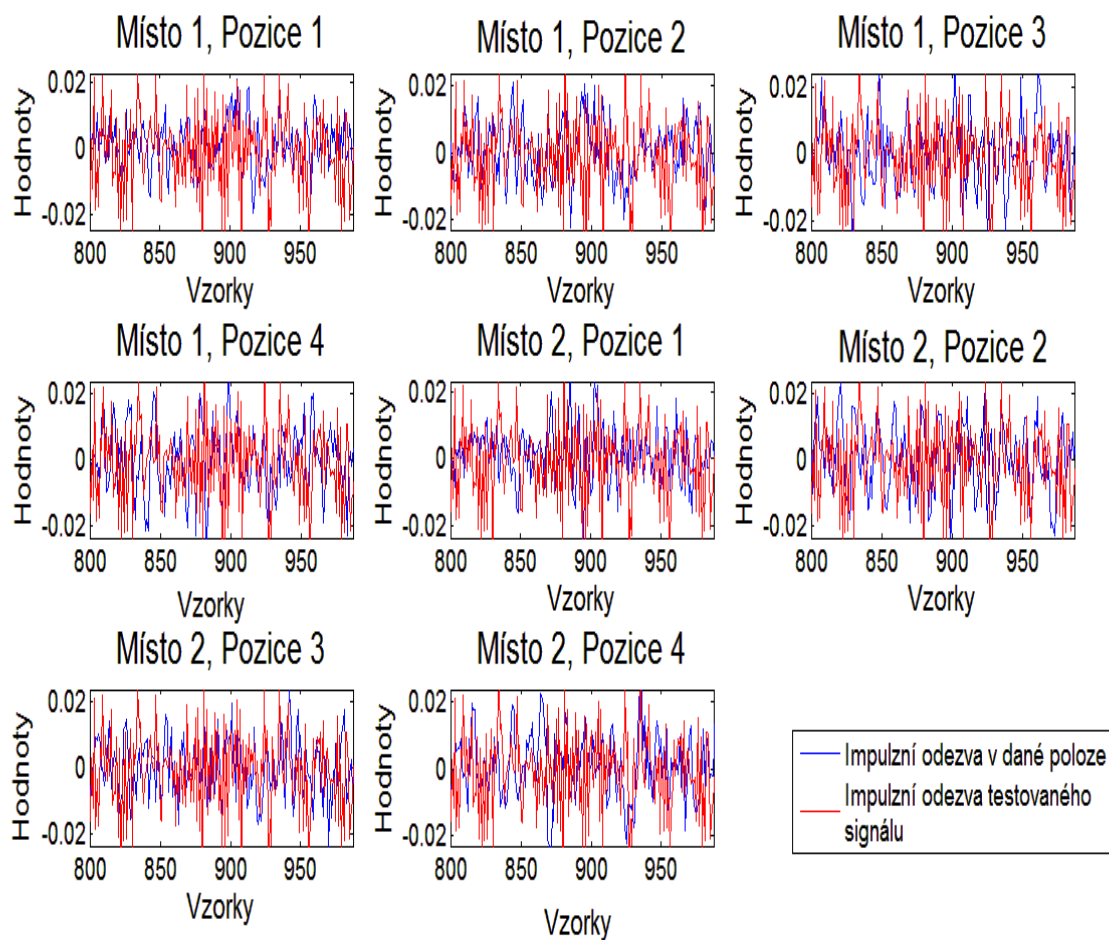
Na základě výsledků provedených pokusů lze předpokládat, že pokud nedochází ke změnám v okolním prostředí, metoda lokalizace polohy zdroje signálu pomocí impulzní odezvy prostředí je schopná poskytnout v mezích, v jakých byly prováděny pokusy, dostatečně přesné výsledky.

5.2.2 Test robustnosti metody

V druhé fázi bylo cílem na základě realizace několika pokusů ověřit, zda bude tato metoda lokalizace polohy zdroje signálu stejně úspěšná, pokud dojde v prostředí, kde byly vytvářeny nahrávky, k nějakým drobným změnám.

Pro tyto testy byly použity nahrávky signálů *m1* a *z1* (označené jako *m13* a *z13* ve všech polohách obsažených v databázi nahraných signálů) v prostředí, ve kterém se podmínky (pozice nábytku v místnosti, zatažení závěsů apod.) za kterých docházelo k nahrávání co nejvíce přiblížily podmínkám během nahrávání původních signálů (*m11* a *z11*). Došlo však i ke změnám, které nešlo vrátit do stavu totožného se situací v době pořízení původních nahrávek (jinak shrnuté povlečení, mírné změny například v umístění židle apod.).

Pokusy uskutečňované v této fázi byli prováděny stejně jako předchozí uvedené experimenty s lokalizací zdroje signálů. Pouze byly použity nově nahrané signály (*m13* ve složce *misto1/pozice1* a *z13* ve složce *misto2/pozice 4*). Výsledek pro signál v *m13* (tento signál byl použit, protože má největší shodu se signálem, pro který počítáme referenční hodnoty filtrů v jednotlivých polohách zdroje) v poloze určené jako *místo 1*, *pozice1* zobrazuje následný obrázek obr. 14 a tabulka tab. 3.



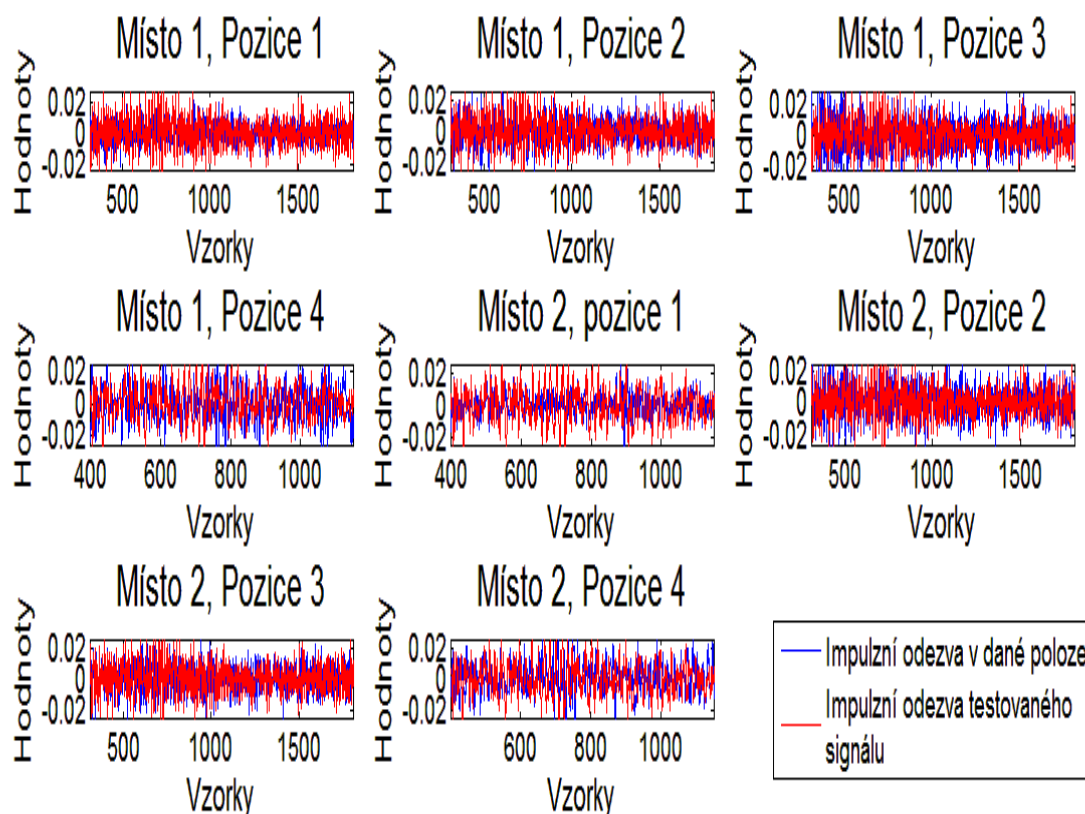
obr. 14: Lokalizace signálu m13 v mírně změněných podmínkách pořízení nahrávky

Umístění zdroje	Rozdíl odezev
Místo 1, Poloha 1	90,51
Místo 1, Poloha 2	97,26
Místo 1, Poloha 3	99,61
Místo 1, Poloha 4	96,35
Místo 2, Poloha 1	96,18
Místo 2, Poloha 2	97,57
Místo 2, Poloha 3	90,91
Místo 2, Poloha 4	96,49

tab. 3: Rozdíly odezev při lokalizaci zdroje signálu m13

V tomto pokusu byla pomocí navrhnutého a testovaného postupu sice správně určena poloha zdroje, ale při porovnání hodnot v tabulce (tab. 3) již nebyl výsledek tolik výrazný.

Jako další byl proveden pokus, kdy byla lokalizována poloha zdroje signálu *z13*, který byl umístěn v databázi ve složce *misto2/pozice4*, prováděný stejným postupem jako předcházející pokusy. Výsledné rozdíly vypočtených filtrů (impulzních odezev) v jednotlivých polohách zdroje zobrazuje obrázek obr. 15 a rozdíly pro jednotlivé polohy jsou zobrazeny v tabulce tab. 4.



obr. 15: Lokalizace signálu *z13* v mírně změněných podmínkách

Umístění zdroje	Rozdíl odezev
Místo 1, Poloha 1	63,58
Místo 1, Poloha 2	70,69
Místo 1, Poloha 3	72,71
Místo 1, Poloha 4	72,01
Místo 2, Poloha 1	66,14
Místo 2, Poloha 2	73,96
Místo 2, Poloha 3	74,32
Místo 2, Poloha 4	72,49

tab. 4: Rozdíly odezev při lokalizaci signálu z13 v poloze místo 2, pozice 4

Při tomto pokusu byla poloha zdroje chybně určena jako poloha *místo 1, pozice 1*. Bylo potřeba zjistit, zda tento nekorektní výsledek se týká pouze tohoto jednoho signálu nebo zda se tato nepřesnost objeví pro všechny nově nahrané signály (*m13, m23, z13, z23*). Proto bylo testováno, jaká poloha bude určena pro tyto signály ve všech možných pozicích zdroje.

Výsledkem tohoto závěrečného testu bylo, že pro všechny takto testované „nové“ signály byla určena opět chybně poloha zdroje jako *místo 1, pozice 1*. Proto lze vyvodit, že tato metoda není dostatečně robustní proti změnám způsobovaným změnami prostředí, kde dochází k nahrávání testovaných signálů.

6 Závěr

Úkolem této práce bylo pomocí navrhnuté a následně vyhodnocené série pokusů zjistit, k jakým proměnám impulzní odezvy (filtru) dochází při změnách v prostředí a signálů a zjistit, zda by bylo možné tyto změny využít k lokalizaci polohy zdroje signálu.

Při studiu změn impulzních odezev bylo zjištěno, že na impulzní odezvu má výrazný vliv změna polohy zdroje signálu. Naopak použití jiného signálu nezpůsobí příliš velkou změnu filtru (impulzní odezvy). Proto by bylo teoreticky možné volit na základě znalosti impulzních odezev v předem určených polohách zdroje signálu tu správnou, ve které je zdroj signálu umístěn. Ovšem tato metoda fungovala správně pouze tehdy, pokud byla používána na signály nahrávané v prostředí, ve kterém nedocházelo k žádným změnám. V následném testu robustnosti tato metoda neuspěla. Pokud byl signál nahráván sice ve stejném prostředí, ale s několika drobnými změnami (jejichž úplná eliminace nebyla možná), tato metoda určila chybně polohu zdroje pro většinu signálů. Jelikož šíření signálu v prostředí, které určuje impulzní odezvu, je natolik komplikovaný proces, že nelze ani přesně určit, co bylo v prostředí změněno a jakým způsobem tyto změny kompenzovat, aby zkoušená metoda lokalizace zdroje spolehlivě fungovala.

I když bylo zjištěno, že pro určování polohy zdroje signálu není vhodné použít metodu zcela postavenou na změnách impulzní odezvy, přesto má využívání impulzní odezvy prostředí jistě mnohé další využití. Jedno z mnoha možných využití by mohlo být například v zabezpečovací technice, kdy při zajištění objektu (místnosti) by byla zaznamenána impulzní odezva daného prostředí a její případná změna by mohla být brána jako důvod ke spuštění poplachu.

7 Použité zdroje

1. SHIMKIN, Prof. N. Estimation09: ch3_Wiener. TECHNION - ISRAEL INSTITUTE OF TECHNOLOGY. [Http://webee.technion.ac.il/~people/shimkin](http://webee.technion.ac.il/~people/shimkin) [online]. 2009 [cit. 2012-05-09]. Dostupné z: http://webee.technion.ac.il/people/shimkin/Estimation09/ch3_Wiener.pdf

8 Obsah CD

- *Vytvořená databáze záznamů*
- *Program pro výpočet filtru a jeho použití na zvolený signál*
- *Program pro lokalizaci pozice zdroje*
- *Elektronická verze této práce*